

# Gedruckte Varaktoren für die Mikrowellentechnik

**C. Kohler<sup>1,2</sup>, A. Friederich<sup>1,2</sup>, M. Nikfalazar<sup>2</sup>, A. Wiens<sup>2</sup>, R. Jakoby<sup>2</sup> und J.R. Binder<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Materialien (IAM), Karlsruher Institut für Technologie

<sup>2</sup> Institut für Mikrowellentechnik und Photonik (IMP), Technische Universität Darmstadt

Institut für Angewandte Materialien (IAM)

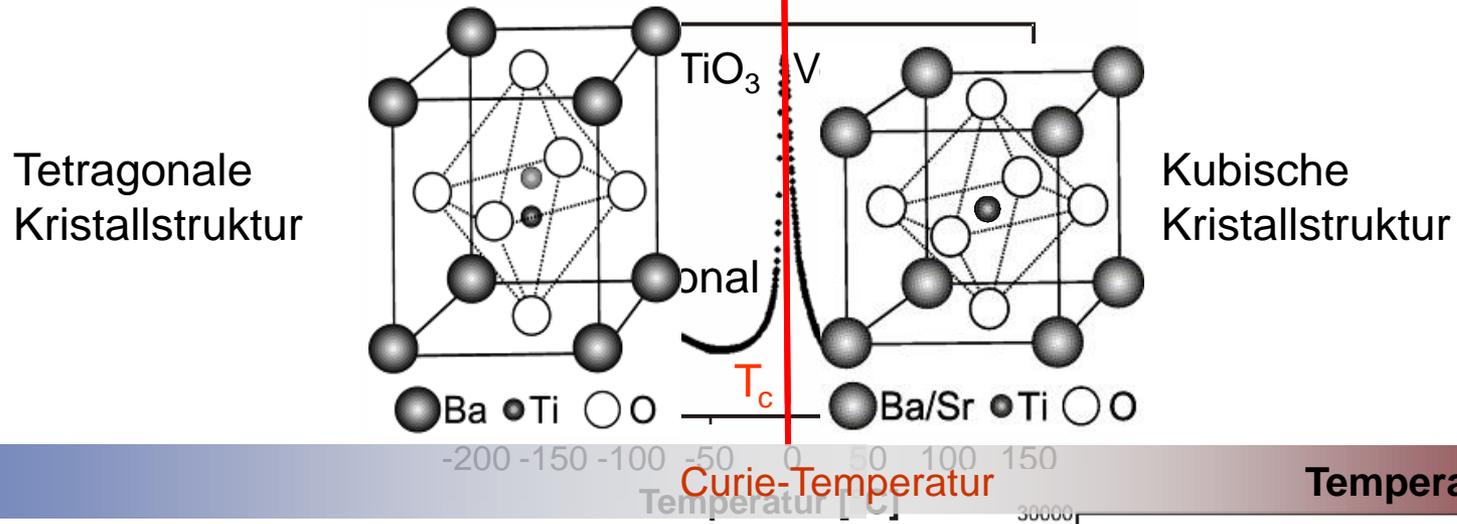
# Gliederung

- Barium-Strontium-Titanat (BST)
- Konzept gedruckter Varaktoren
- Materialentwicklung BST-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Komposite
- Vollständig **siebgedruckte** Varaktoren und Phasenschieber
- Vollständig **tintenstrahlgedruckte** Varaktoren und Phasenschieber
- Zusammenfassung und Ausblick

# System $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (BST)

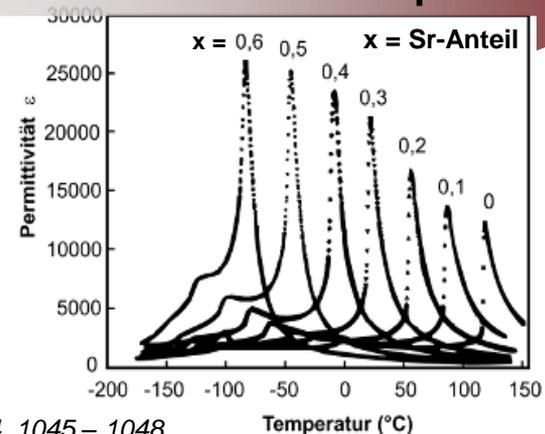
Ferroelektrische Phase

Paraelektrische Phase



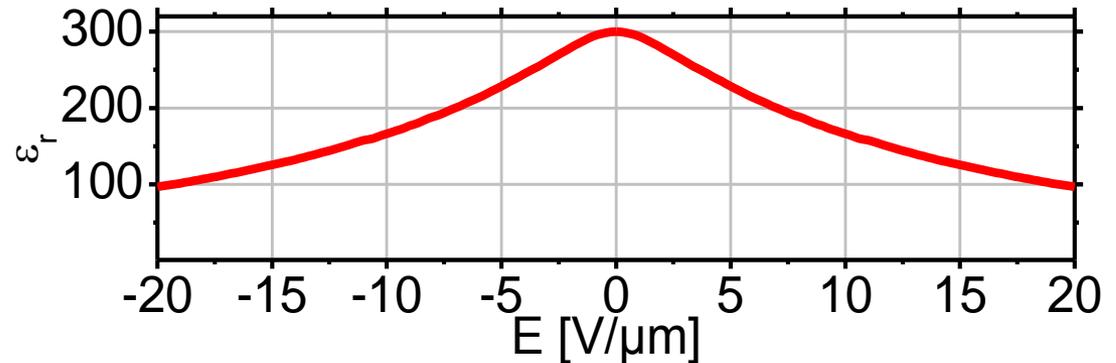
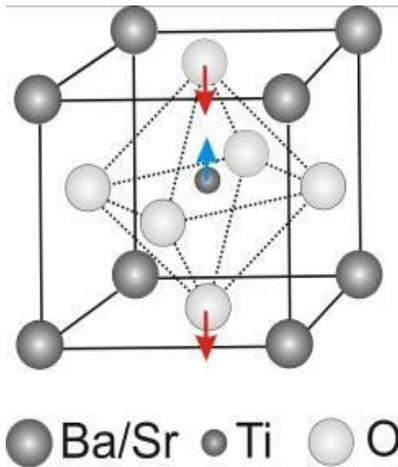
## Für Mikrowellenanwendungen:

- Verwendung der paraelektrische Phase
- Anwendung bei RT  $\rightarrow Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$



Jeon, J., *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2004, 24, 1045–1048

# Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>TiO<sub>3</sub> als steuerbares Dielektrikum



BST zeigt eine nicht-lineare Abhängigkeit der Permittivität von einem E-Feld

## Auslenkung des Ti<sup>4+</sup>-Ions durch ein äußeres elektrisches Feld

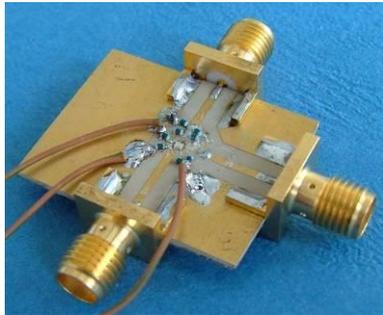
- *Leistungslose Steuerung*
- *Kontinuierlich steuerbar*
- *Ansteuerung im ns-Bereich*

### Dielektrische Steuerbarkeit

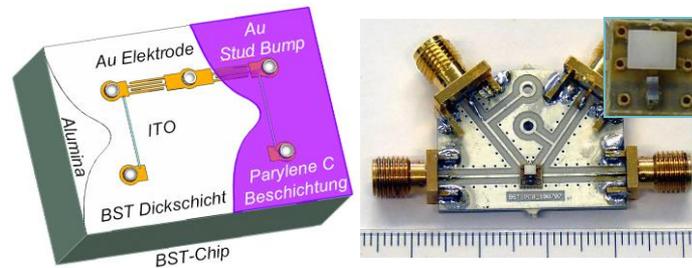
$$\tau_{\varepsilon}(\mathbf{E}) = \frac{\varepsilon_r(\mathbf{E}=0) - \varepsilon_r(\mathbf{E})}{\varepsilon_r(\mathbf{E}=0)}$$

# BST-Dickschicht basierte Mikrowellenbauteile

## Steuerbarer Filter

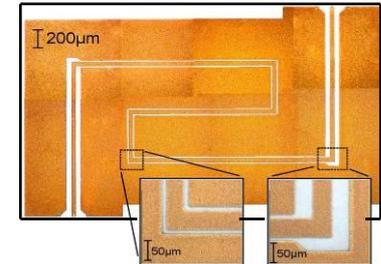


## Steuerbares Anpassnetzwerk



## Phasenschieber

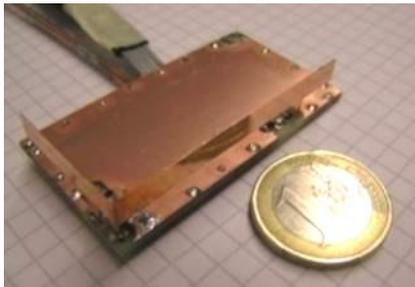
### CPW basierter Phasenschieber



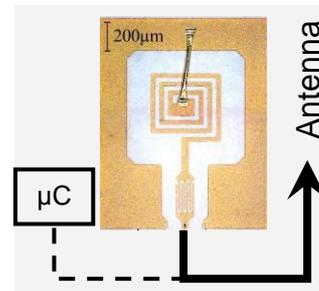
### Left-handed phase shifter



## Multibandantenne



## RF-ID Modulator



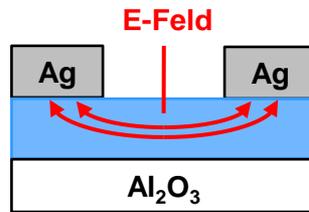
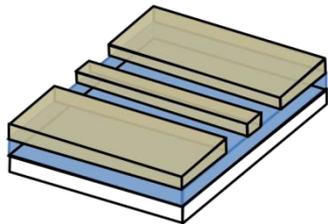
Institut für Mikrowellentechnik, Technische Universität Darmstadt

<http://www.mwe.tu-darmstadt.de/de/fachgebiete/mikrowellentechnik/forschung/ferroelectrics/ferroelectrics.html>

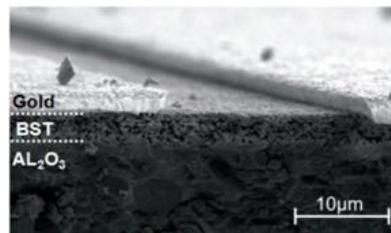
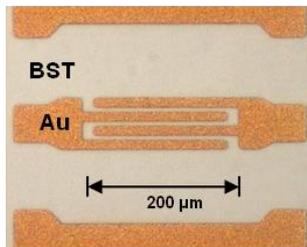
# Konzept Varaktoren (Steuerbare Kondensatoren)

## Bisher:

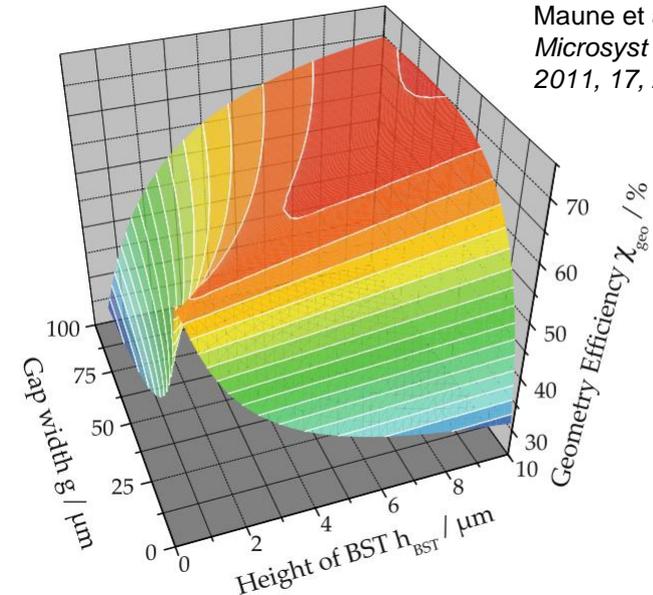
- Planare Strukturen
- Lithographische Prozessierung der Elektroden **nach** Sintern von BST



■ BST □ Ag □ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



→ Realisierung in Form eines Interdigital-Kondensators



Maune et al.,  
*Microsyst Technol.*,  
2011, 17, 213–224

## Geometrieeffizienz

$$\chi_{geo} = \frac{\text{Steuerbarkeit (IDC)}}{\text{Steuerbarkeit (Material)}}$$

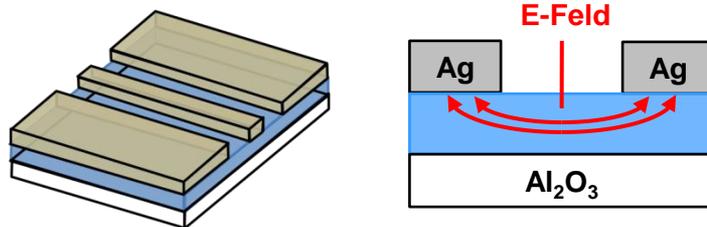
→ Abhängig von Schlitzbreite IDC, Höhe BST

→ Bei 10 μm Schlitzbreite Optimum  $\chi_{geo} = 73\%$

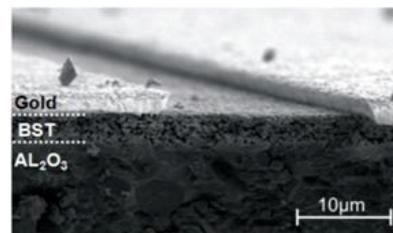
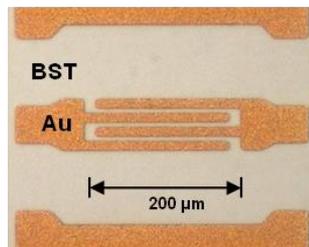
# Konzept Varaktoren (Steuerbare Kondensatoren)

## Bisher:

- Planare Strukturen
- Lithographische Prozessierung der Elektroden **nach** Sintern von BST



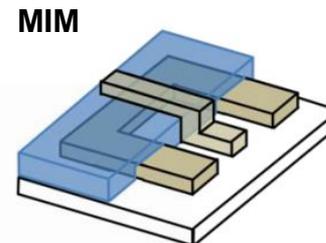
■ BST □ Ag □ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



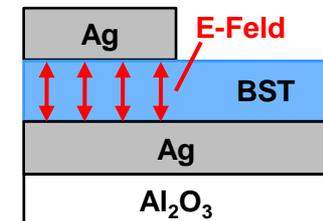
→ Realisierung in Form eines Interdigital-Kondensators

## Neuer Ansatz:

- MIM-(Metall-Isolator-Metall) Anordnung
- Multilagendruck von BST und Elektroden mit anschließendem Kosintern (850-900°C)



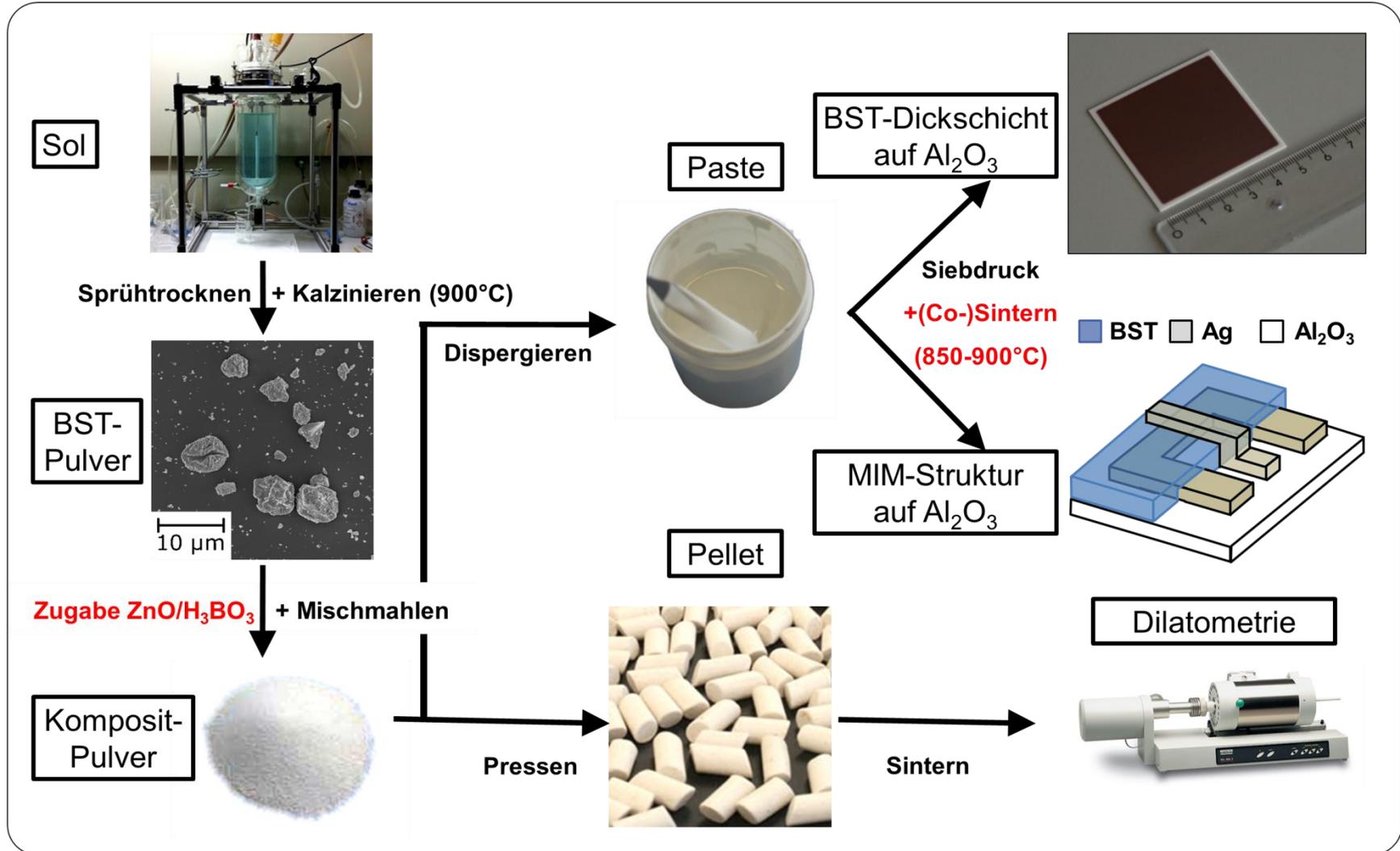
■ BST □ Ag □ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



- + höhere Steuerbarkeitseffizienz
- + geringere Spannungen notwendig
- reine BST-Dickschicht zu hohe Sinter Temperatur (1150-1200°C)
- bisher nur mit Pt o.ä. als untere Elektrode möglich → teuer, schlechte Leitfähigkeit

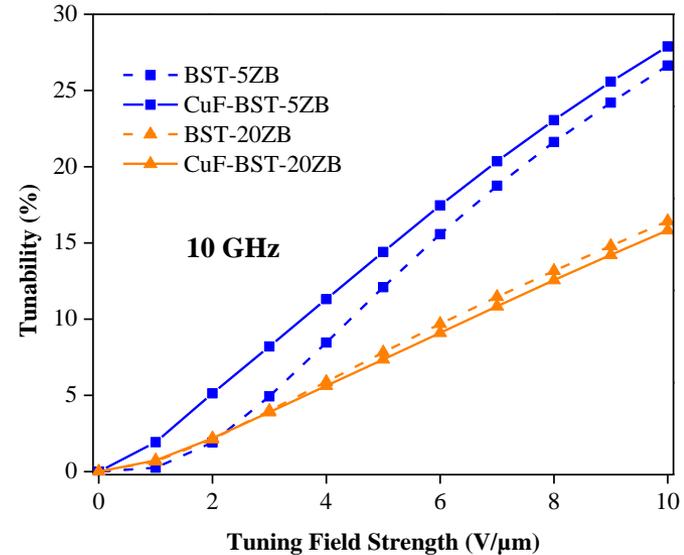
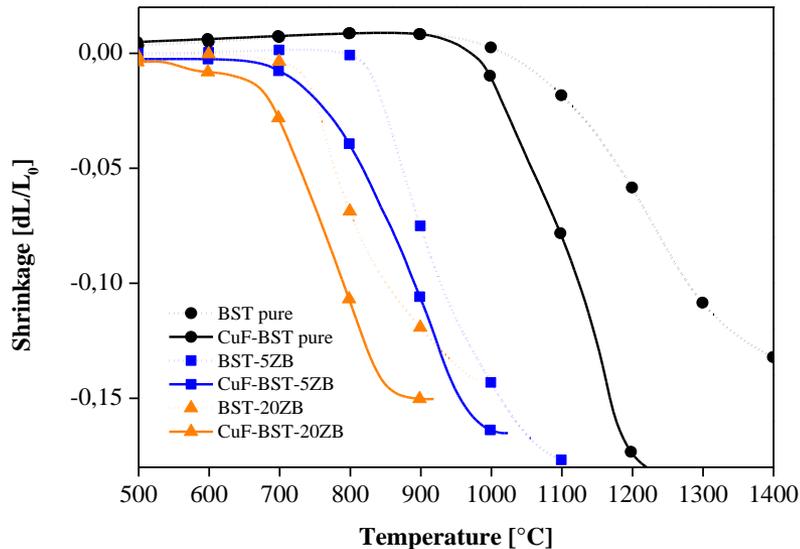
→ Ziel: Entwicklung niedrig-sinternder BST-Komposit

# Entwicklung von BST-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Kompositen



Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209  
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

# Ergebnisse – BST-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Komposite



→ Drastische Herabsetzung Sinterterperatur

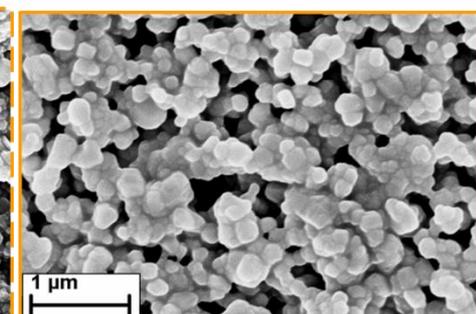
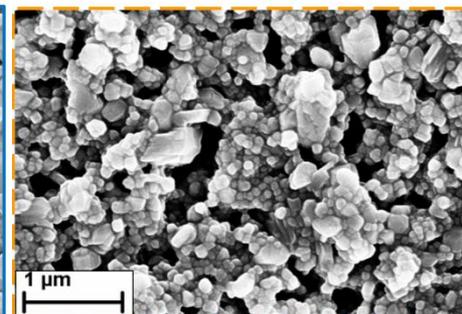
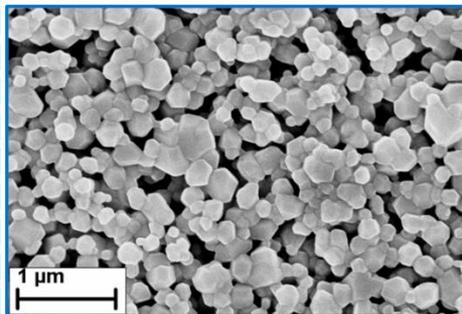
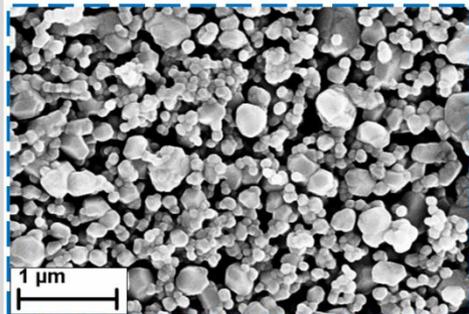
→ Wahrung guter dielektrischer Eigenschaften

BST-5ZB

CuF-BST-5ZB

BST-20ZB

CuF-BST-20ZB



→ Abhängigkeit der Mikrostruktur von Zusatz ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sowie Cu-F- Dotierung von BST

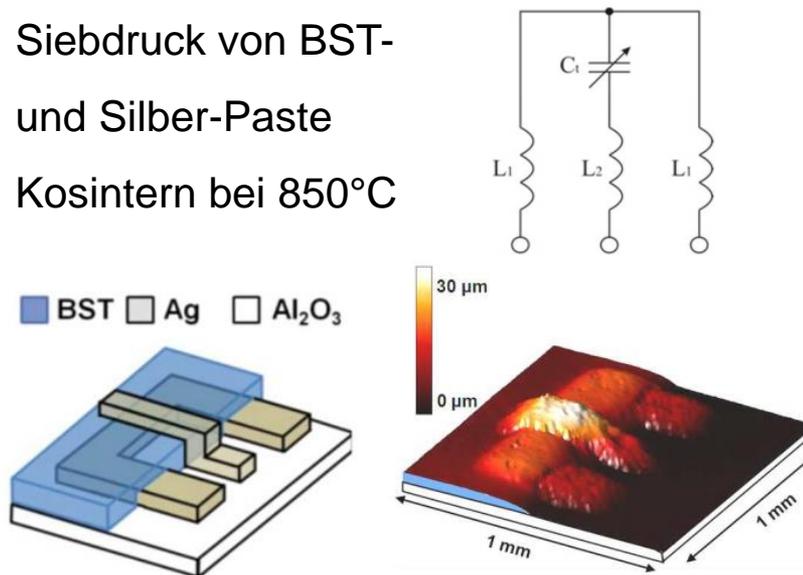
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209

Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

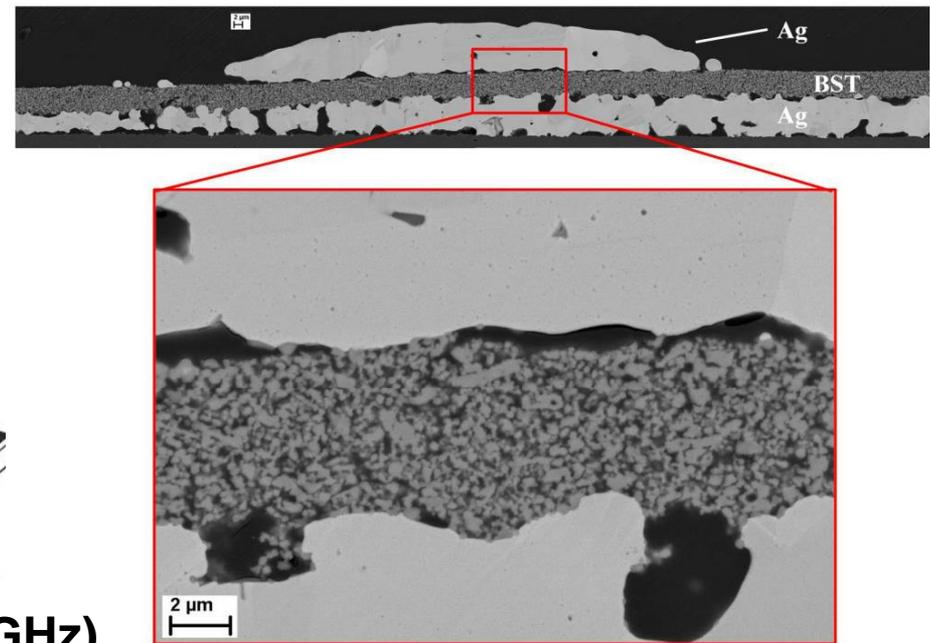
# MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

## Konzept und Realisierung

- Siebdruck von BST- und Silber-Paste
- Kosintern bei 850°C



## Querschnitt



## Dielektrische Eigenschaften (3 GHz)

Testing structure	Capacitance (pF)	Relative permittivity	Quality factor (1/tan δ)	Tunability (%) (at 10 V/μm)	Applied tuning voltage (V)
CPW <sup>1</sup>	-	214	38	28.6	200
MIM <sup>2</sup>	2.9	197	25	37.8	60

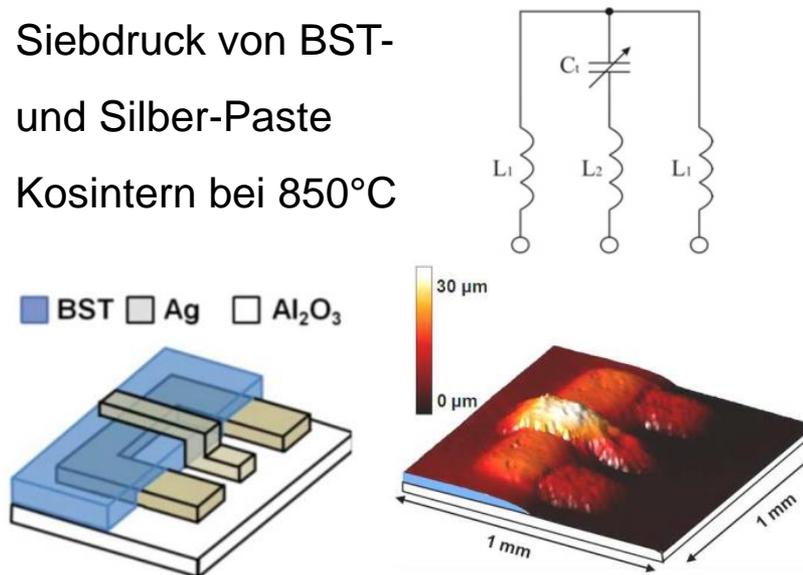
<sup>1</sup>) CPW with gap width of 20 μm    <sup>2</sup>) MIM varactor with 6 μm electrode distance

Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209  
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

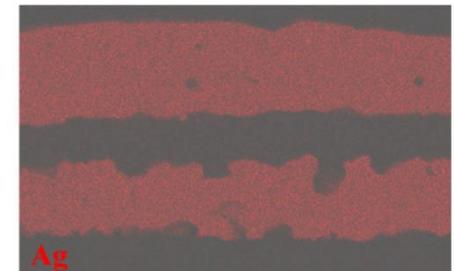
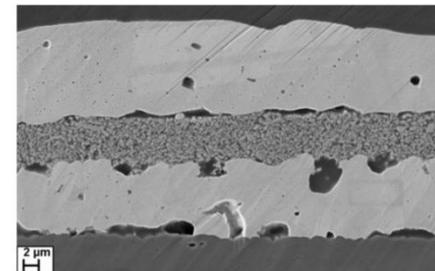
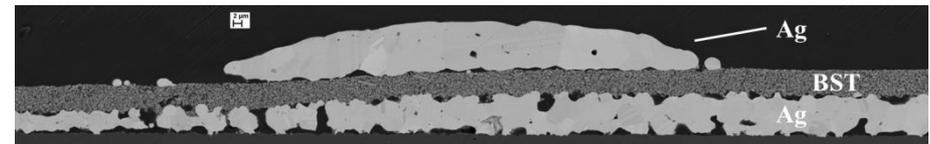
# MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

## Konzept und Realisierung

- Siebdruck von BST- und Silber-Paste
- Kosintern bei 850°C



## Querschnitt (EDX)



## Dielektrische Eigenschaften (3 GHz)

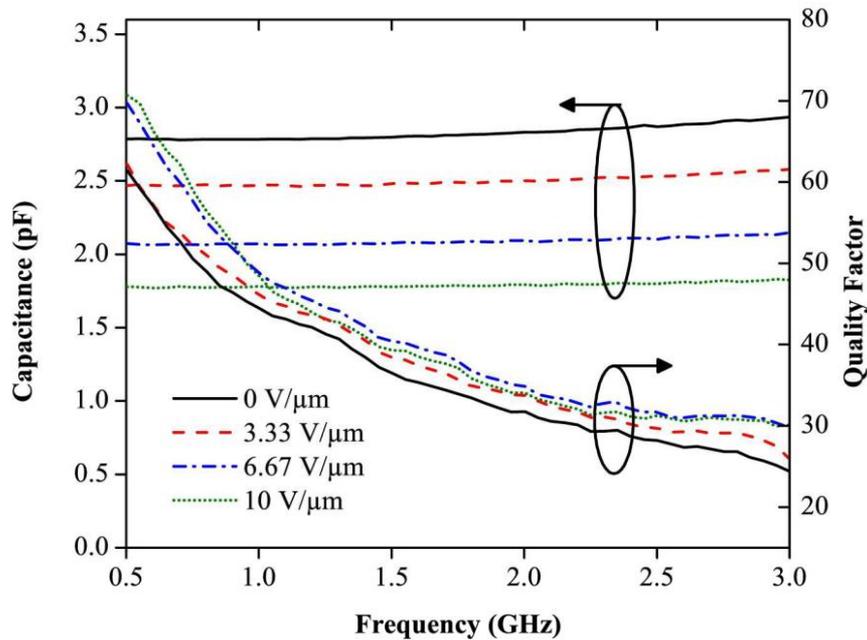
Testing structure	Capacitance (pF)	Relative permittivity	Quality factor (1/tan $\delta$ )	Tunability (%) (at 10 V/ $\mu$ m)	Applied tuning voltage (V)
CPW <sup>1</sup>	-	214	38	28.6	200
MIM <sup>2</sup>	2.9	197	25	37.8	60

<sup>1</sup>) CPW with gap width of 20  $\mu$ m    <sup>2</sup>) MIM varactor with 6  $\mu$ m electrode distance

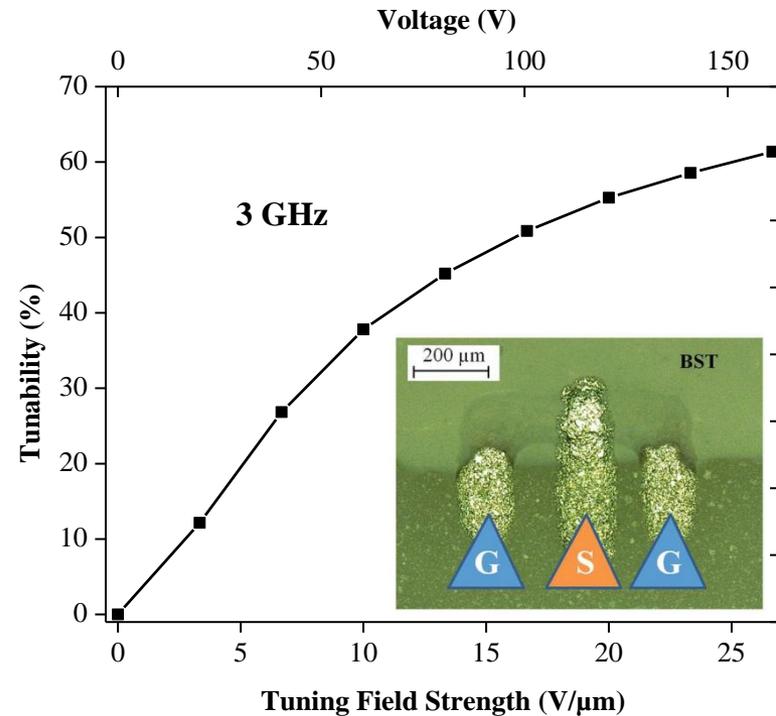
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209  
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

# MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

## Kapazität/Q-Faktor



## Steuerbarkeit

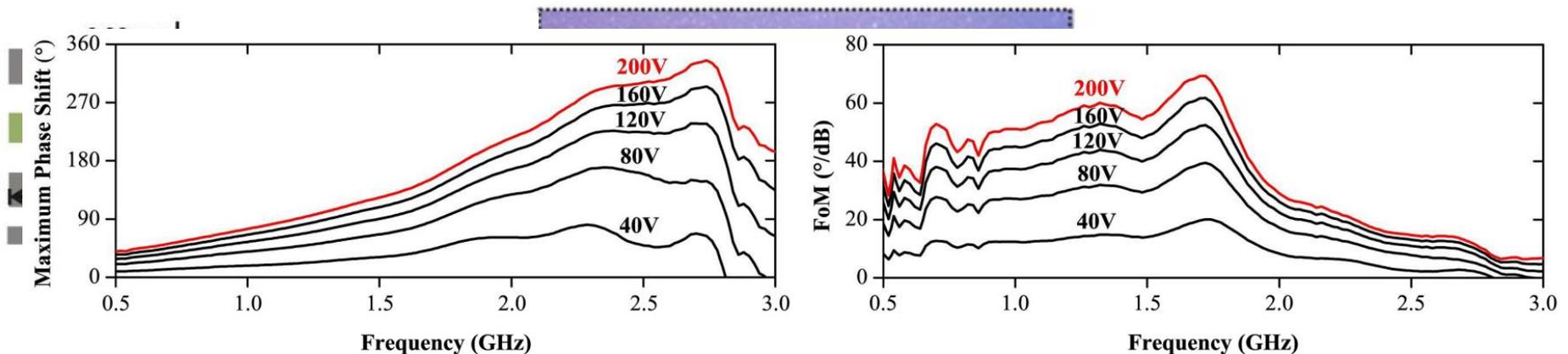


Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209  
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

# Vollständig siebgedruckter Phasenschieber

## Konzept und Realisierung

Arbeitsprinzip: Ein Signal wird entlang einer *transmission line* durch steuerbare Kapazitäten verzögert → Die Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  kann dabei durch eine angelegte Gleichspannung gesteuert werden



→ Eignung des Materials sowie des Siebdruckprozesses für die Herstellung von vollgedruckten Mikrowellenbauteilen bewiesen



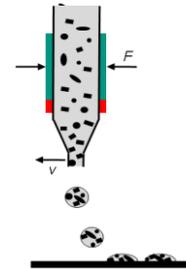
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209  
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

# Transfer auf Tintenstrahldruck

- Drucksystem Autodrop Professional, Microdrop
  - Druckkopf Eindüsenkopf, 100 µm Durchmesser

## Tintenanforderungen

- Partikelgröße:  $d_{\text{Partikel,max}} \ll d_{\text{Kapillare}}$
- Stabilität:
  - Sedimentation vernachlässigbar klein
  - keine Agglomeration im Prozess



- Fluidmechanik

- Reynoldszahl:

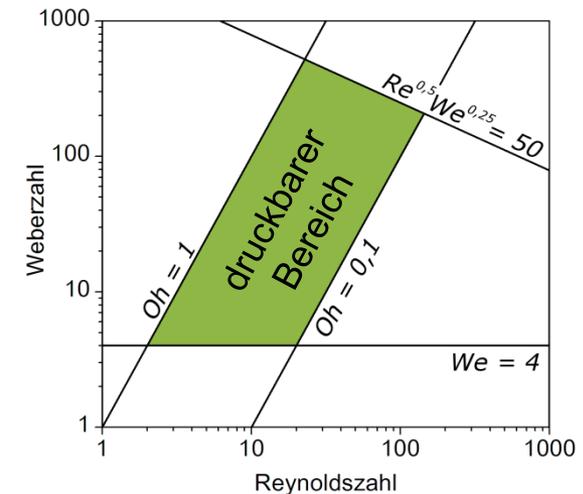
$$Re = \frac{v \rho a}{\eta} \quad \text{„Trägheit/Zähigkeit“}$$

- Weberzahl:

$$We = \frac{v^2 \rho a}{\gamma} \quad \text{“Trägheit/Oberflächenk.”}$$

- Ohnesorgezahl:

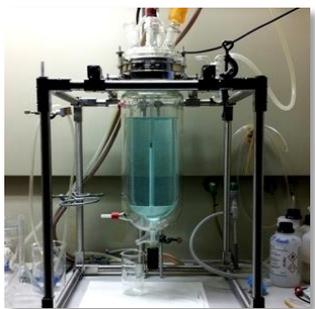
$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{(\gamma \rho a)^{1/2}}$$



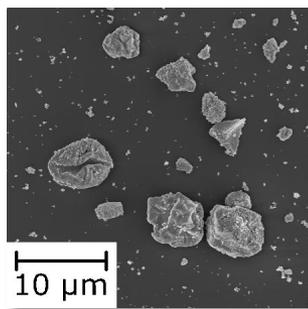
# Ausgangspunkt

- Etablierte Siebdruck-Prozesskette am IAM-WPT vorhanden (Paul, Zhou, Kohler)
- **Problem:**  
Die Dispersionen erfüllen nicht die Partikelgrößen-Anforderungen des Tintenstrahldrucks

## etablierte Prozesskette für den Siebdruck



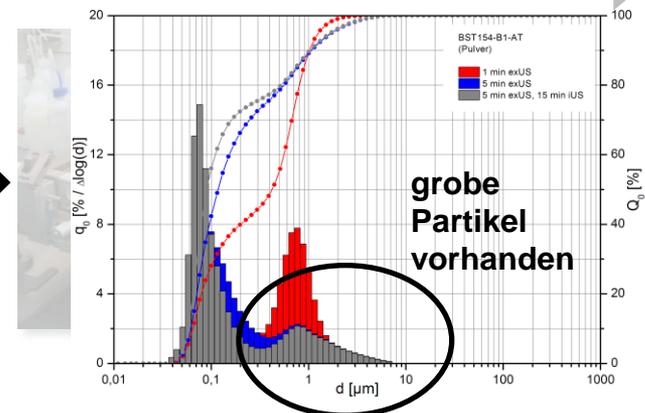
Sol-Gel  
Synthese



Sprühtrocknung  
+ Kalzination

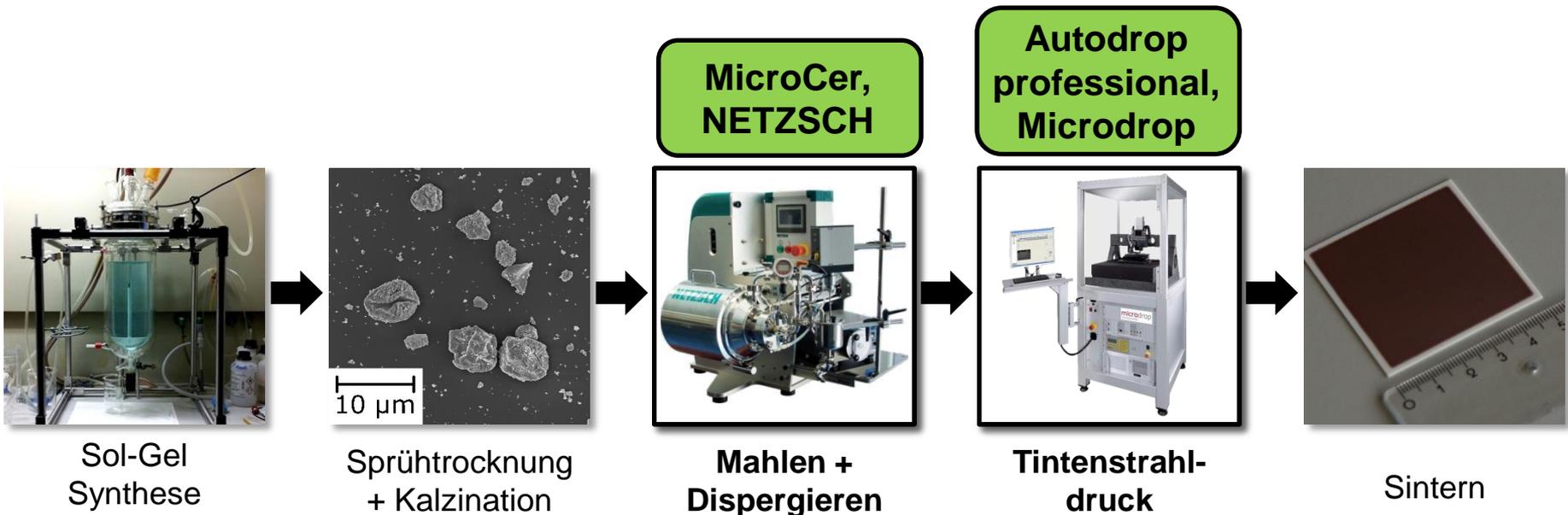


Mahlen +  
Dispergieren



# Vorgehensweise

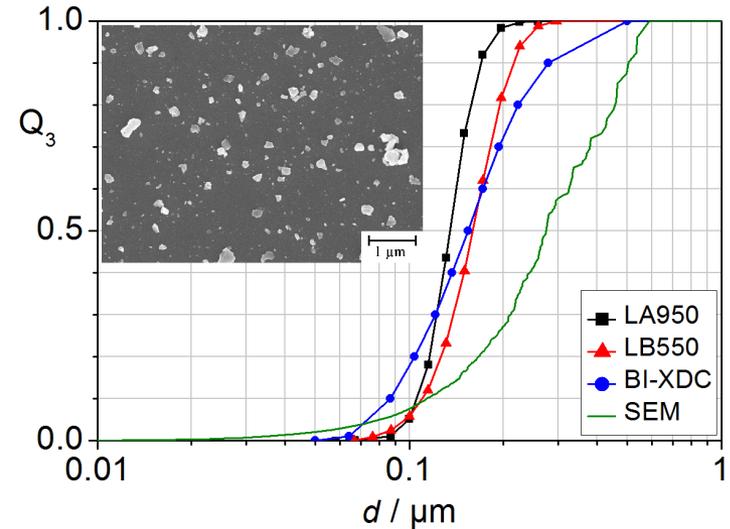
- Auswahl eines geeigneten Mahlprozesses  
→ Rührwerkskugelmühle
- Entwicklung von geeigneten Tintenzusammensetzungen



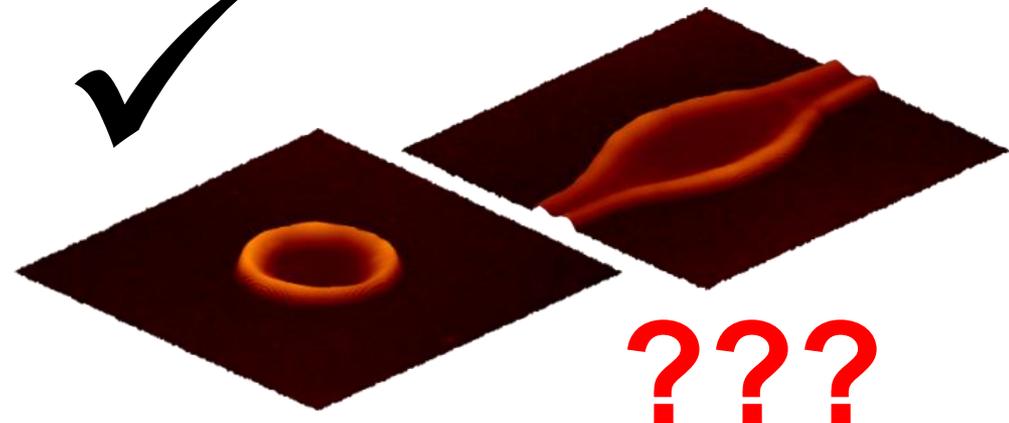
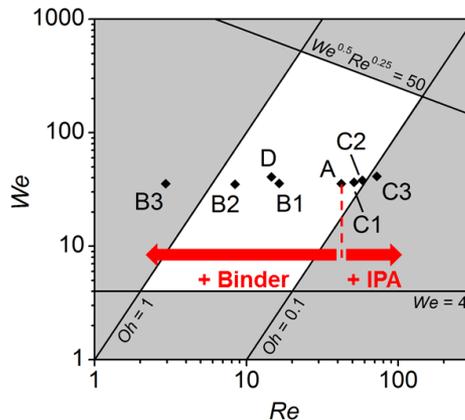


# Tinten-Eigenschaften

- Partikelgröße
  - $d_{50} = 150\text{--}300\text{ nm}$
  - $d_{\text{max}} < 1\text{ }\mu\text{m}$
- Stabilität
  - keine Sedimentation erkennbar (über Monate)



- Fluidmechanische Eigenschaften

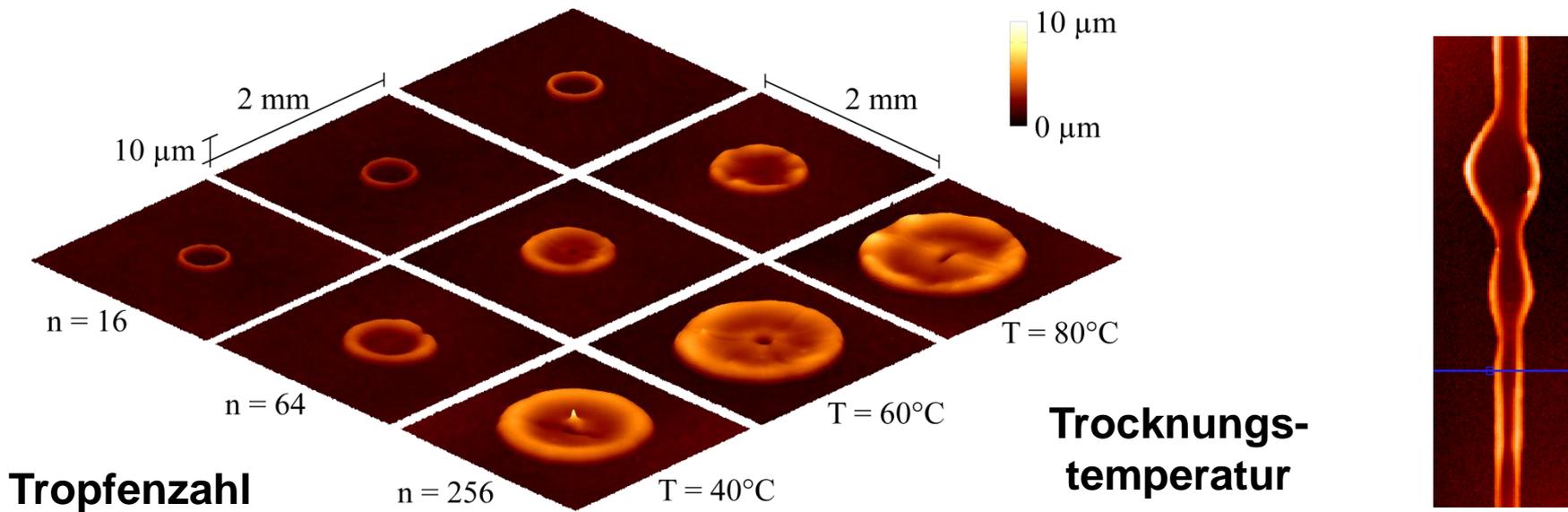


(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

# Druckversuche

## Ausgangstinte (nur Lösemittel, Pulver und Dispergator)

- Druck von punktförmigen Strukturen mit verschiedenem Volumen
- Variation der Trocknungstemperatur zwischen 40°C und 80°C

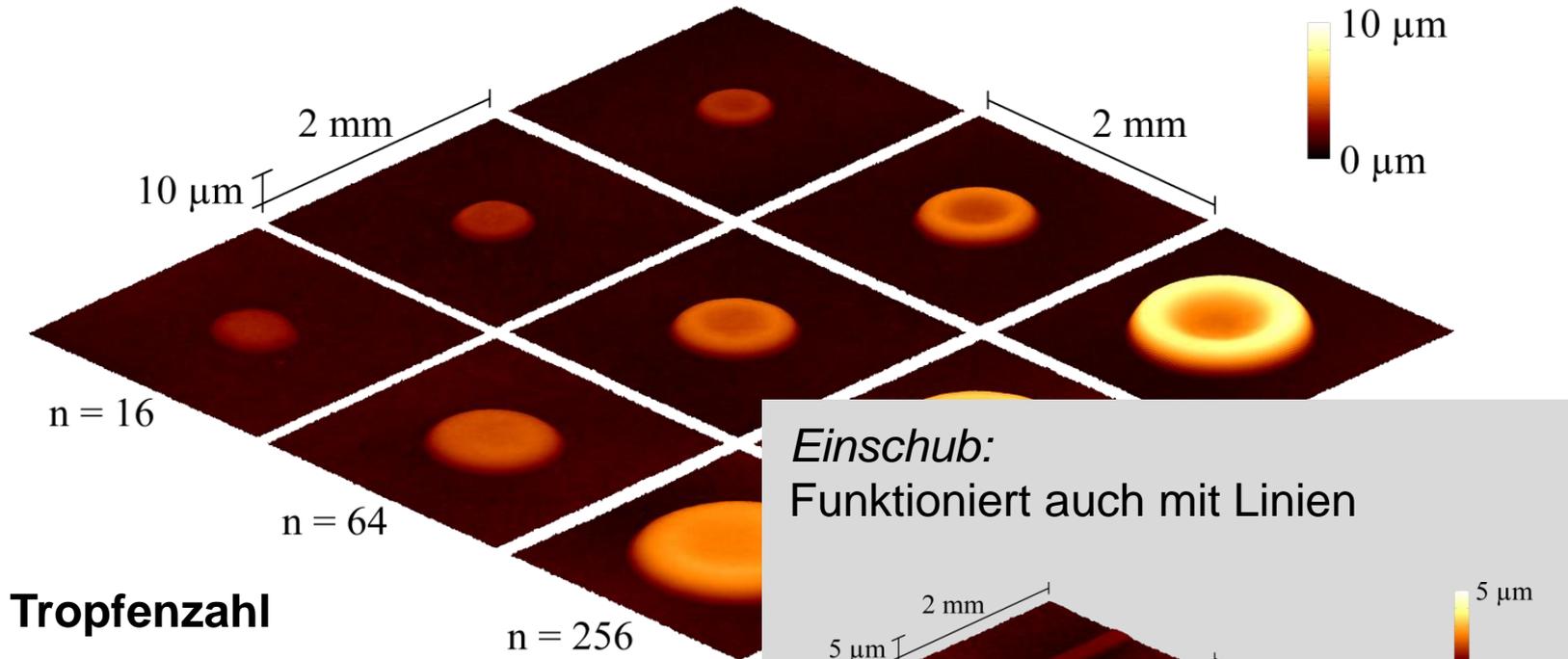


→ sehr ungleichmäßige Topographie (Punkte und Linien)

(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

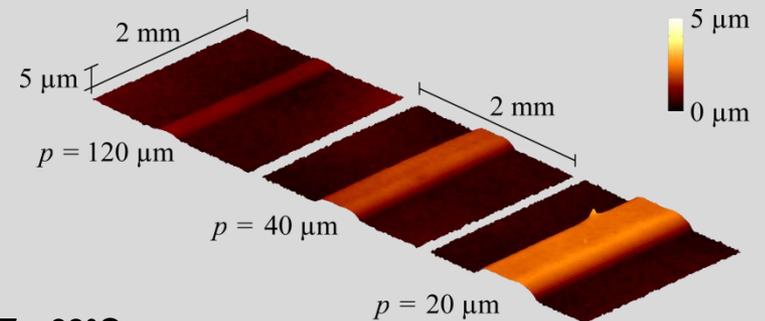
# Optimierte Tintenzusammensetzung

Zugabe von 1 Vol.-% Binder und 49 Vol.-% IPA



**Tropfenzahl**

*Einschub:*  
Funktioniert auch mit Linien



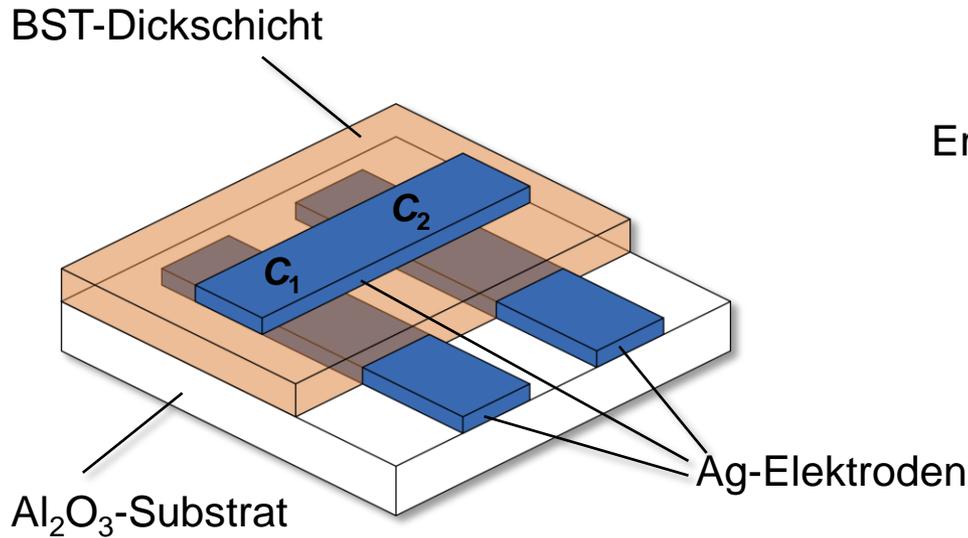
→ Übergang von „Tropfenfo

→ Konturoptimum durch Te

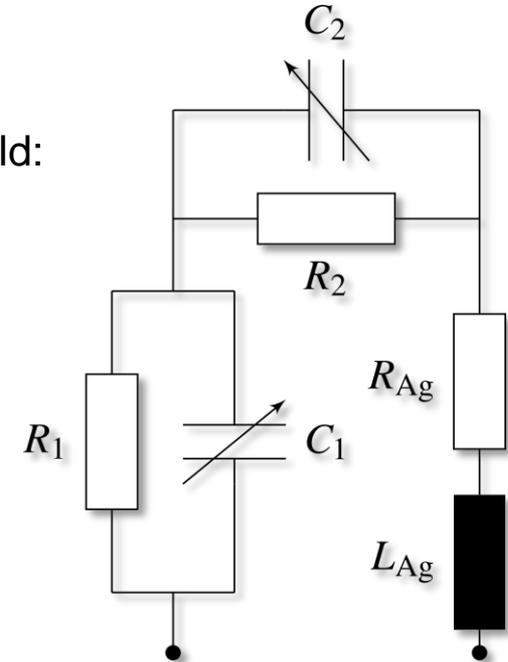
(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

T = 60°C

# Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Entwurf



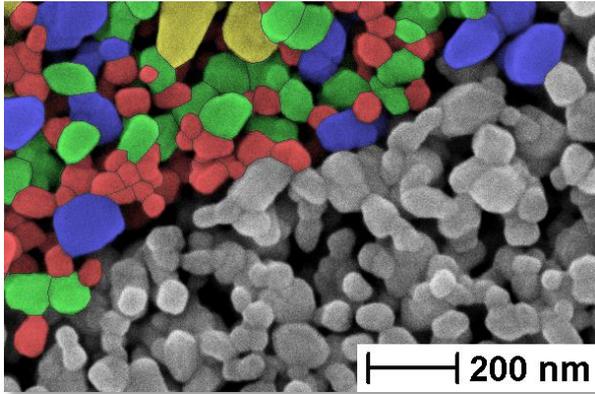
Ersatzschaltbild:



- Vorteile des gewählten  $\pi$ -Layouts:
  - Verringerte Kapazität durch Serienschaltung
  - Vermeidung von Elektrodendruck über Linienkanten hinweg
- Variierte Parameter: Druck von 1–3 Lagen BST  
(entspricht 3–9  $\mu\text{m}$  Schichtdicke)

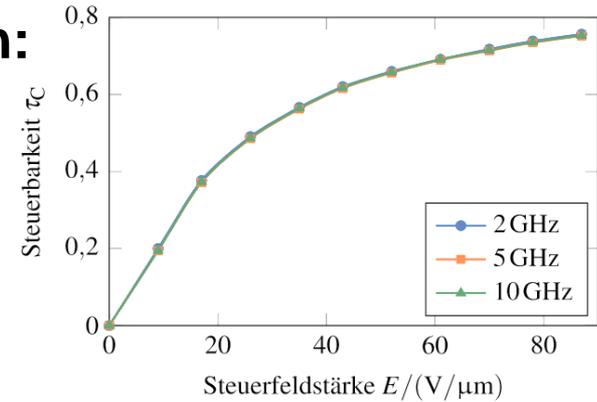
# BST-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dickschichten mittels Tintenstrahldruck

- Mikrostruktur



**Sinterbedingungen:**  
1h @ 850°C

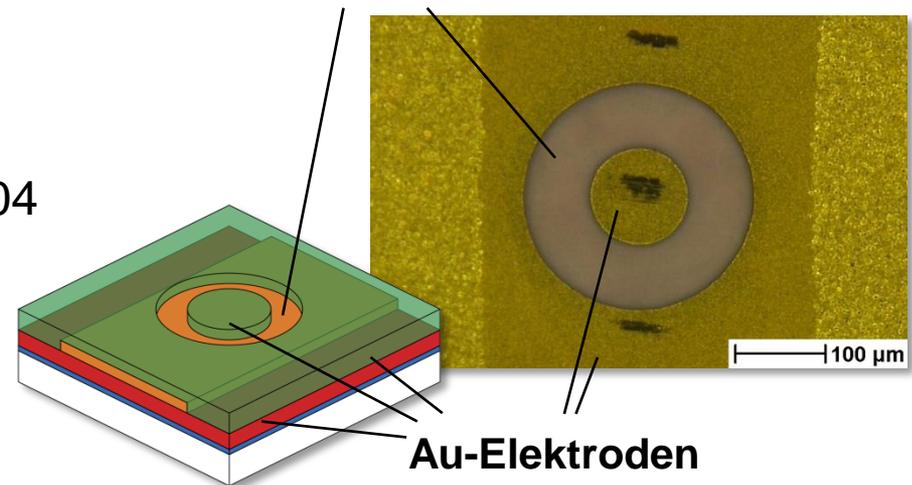
**Korngröße:**  
 $d_{50} = 0,14 \mu\text{m}$



- Eigenschaften bei  $f = 3 \text{ GHz}$

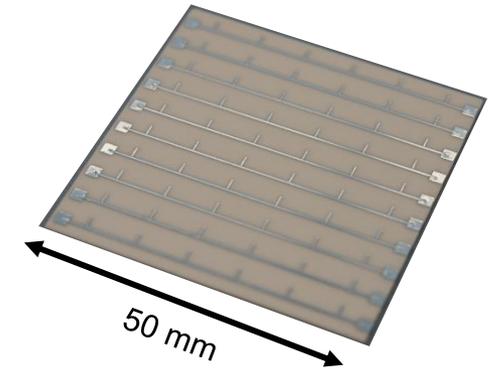
- Relative Permittivität:  $\epsilon_r = 130$
- Verlustfaktor:  $\tan \delta = 0,04$
- Steuerbarkeit:  $\tau = 41 \%$   
(@ 20 V/ $\mu\text{m}$ )

## BST-Dickschicht



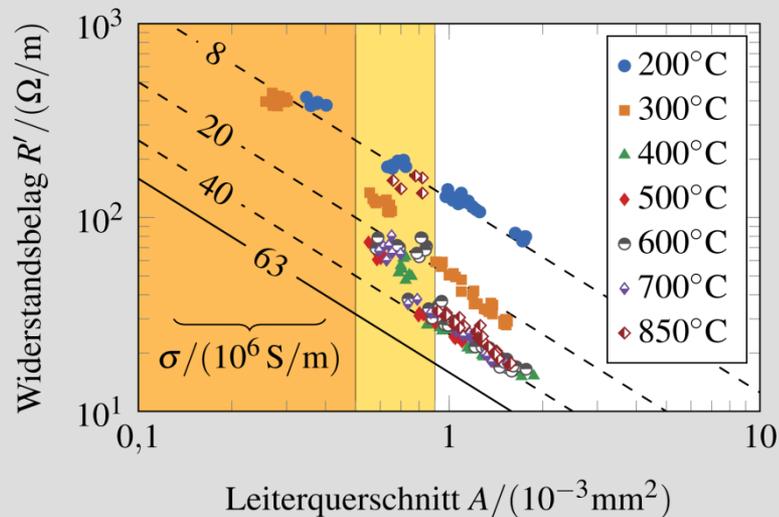
# Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Leitfähigkeit der Elektroden

- *Problem:* starke Sinteraktivität bei  $T_S = 850^\circ\text{C}$
- *Untersuchung:* Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Schichtdicke und Sinter Temperatur



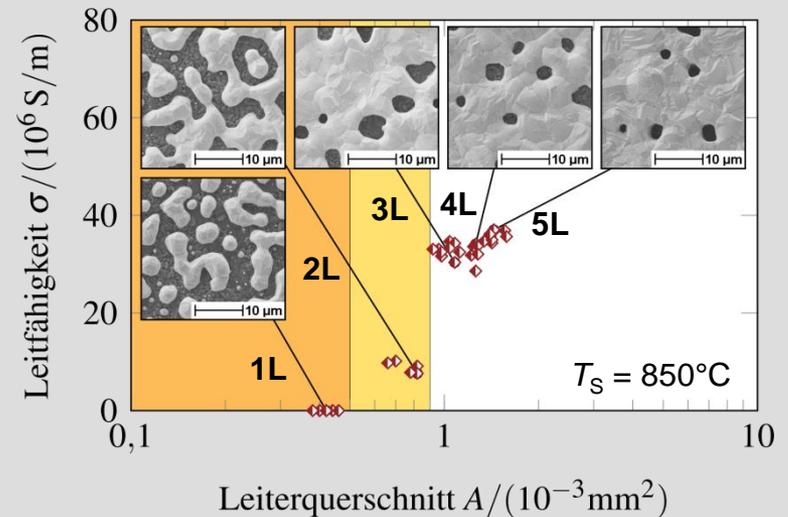
## Widerstandsbelag

$$R' = R / l$$



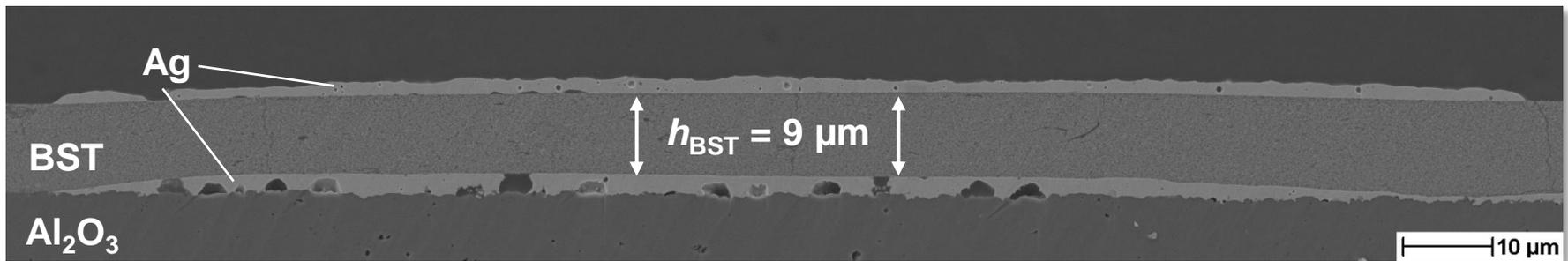
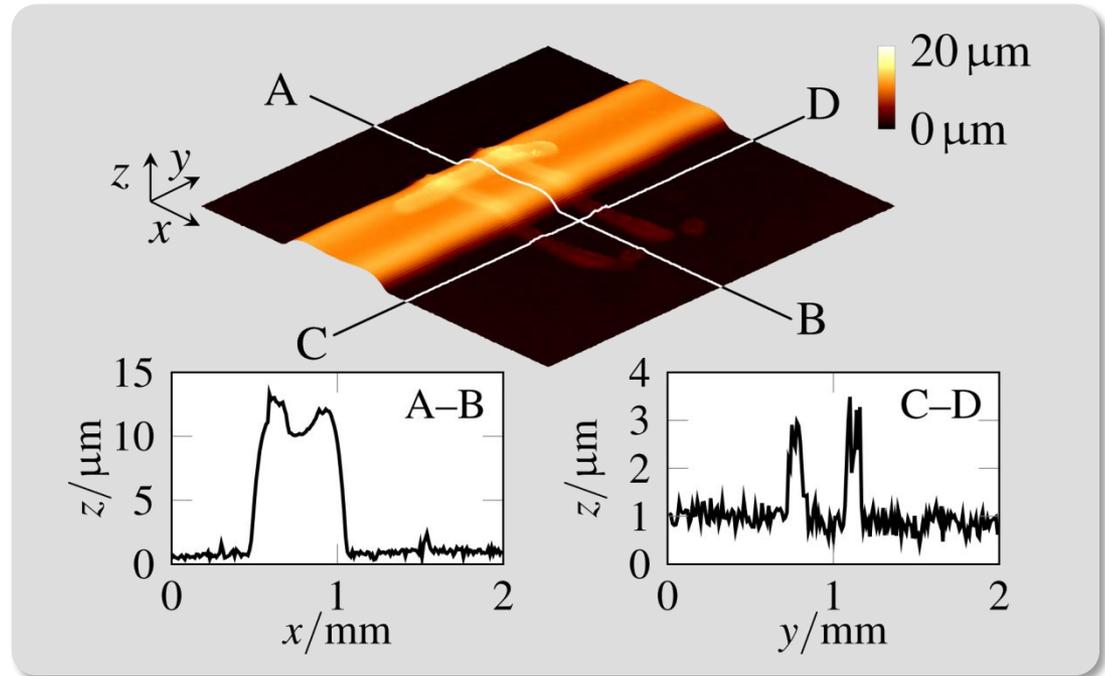
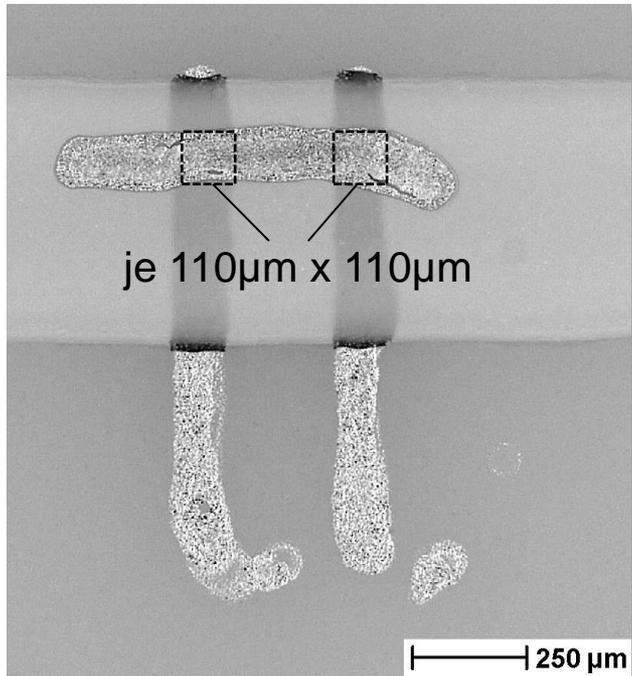
## Leitfähigkeit

Linienbreite:  $w \approx 400 \mu\text{m}$

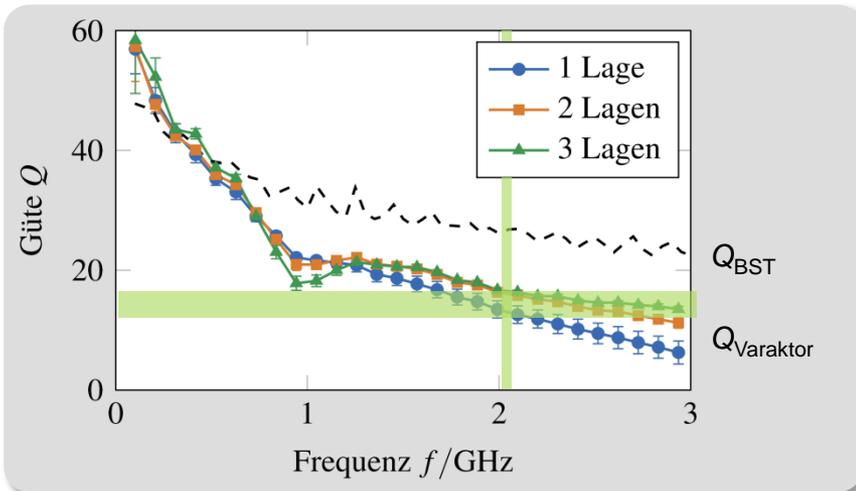
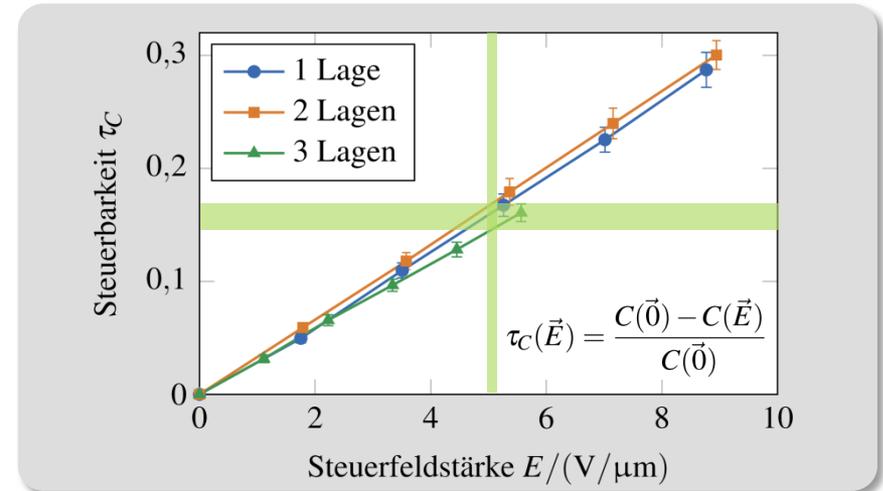
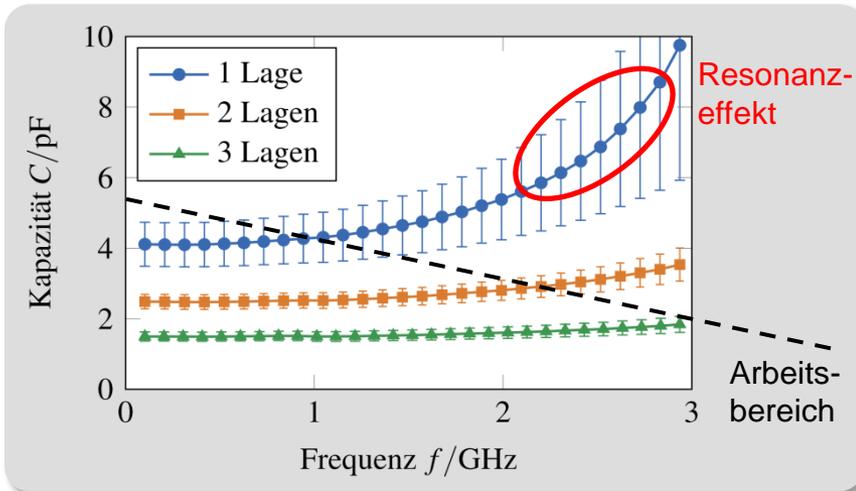


3 Lagen bzw.  $h_{\text{Ag}} \approx 2 \mu\text{m}$  notwendig für eine gute Leitfähigkeit

# Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Schichttopografie



# Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Eigenschaften

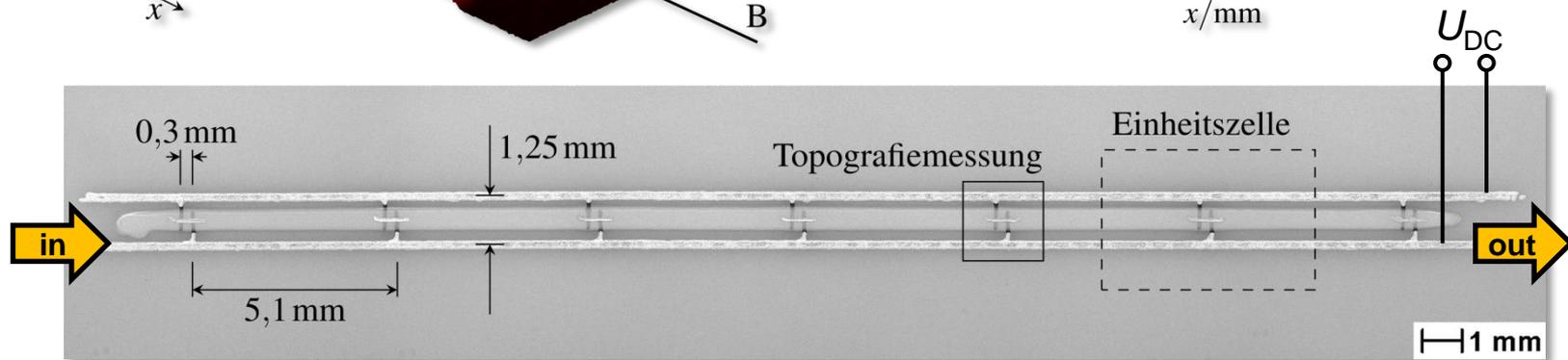
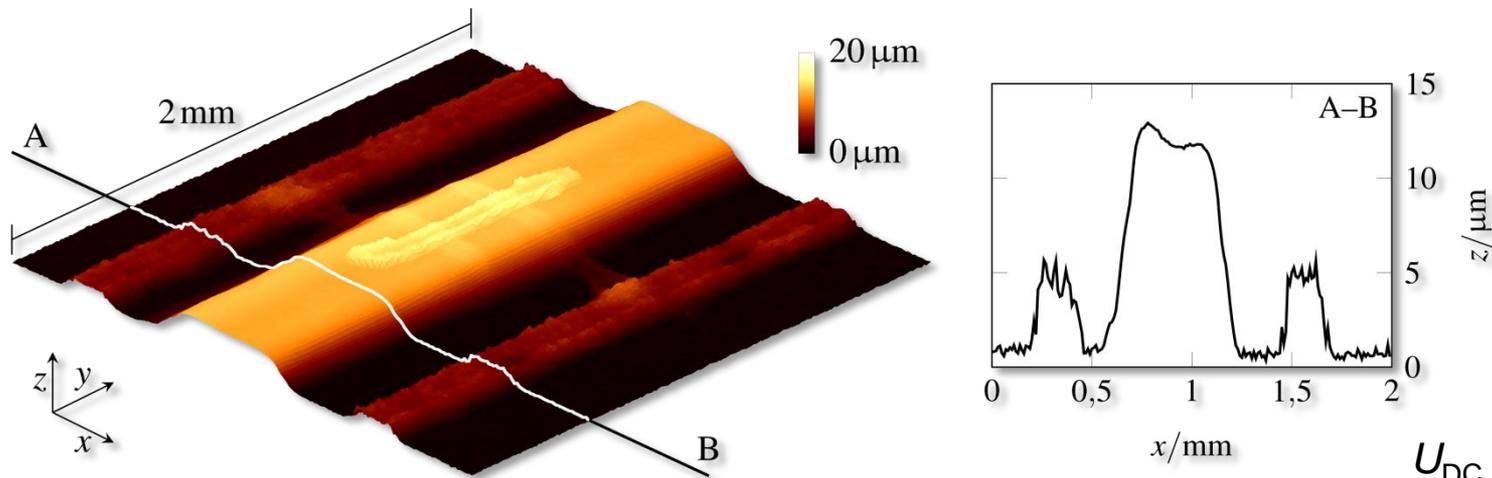


## Eigenschaften:

- Kapazität:  $C_0 = 1,5\text{--}4 \text{ pF}$
- Güte:  $Q = 15\text{--}20$   
(@ 2 GHz)
- Steuerbarkeit:  $\tau_C = 14\text{--}17 \%$   
(@ 5 V/ $\mu\text{m}$ )

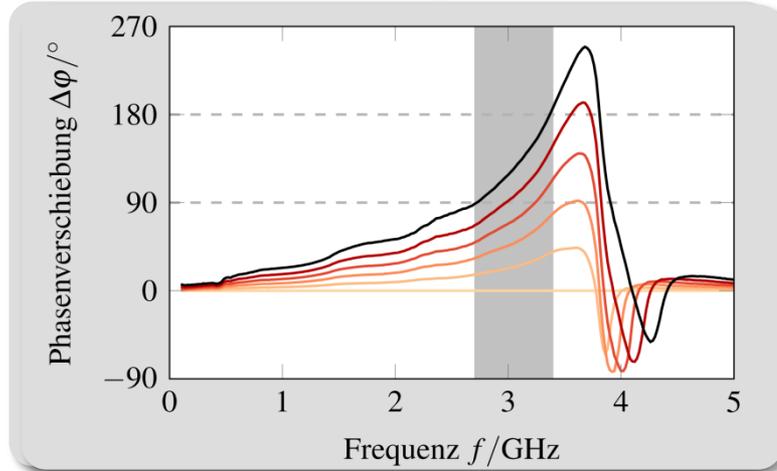
# Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Aufbau und Topografie

Arbeitsprinzip: Ein Signal wird entlang einer *transmission line* durch steuerbare Kapazitäten verzögert → Die Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  kann dabei durch eine angelegte Gleichspannung gesteuert werden

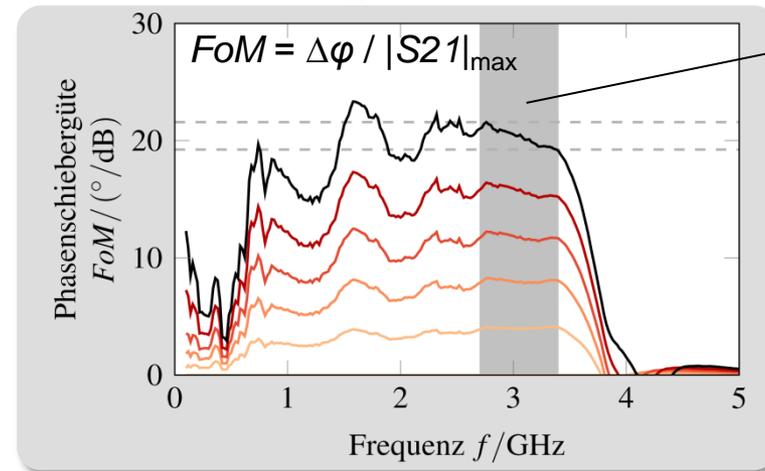


# Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Eigenschaften und Einordnung Literatur

## Phasenverschiebung



## Phasenschiebergüte



Arbeitsbereich

## Vollständig gedruckte L-/S-Band-Phasenschieber

Quelle	Methode	Dielektrikum	Elektroden	Varaktortyp	Sintertemperatur (°C)	f (GHz)	$\Delta\phi_{\max}$ (°)	FoM (°/dB)	$V_{\max}$ (V)
Hu (2005)	Siebdruck	BST-MgO	Ag	Koplanar	1300	2,5	49	20	100
Hu (2006)	Siebdruck	BST-MgO	Ag, Pt	MIM	1260	2,5	63	21	100
Palukuru	Siebdruck	BST-Li <sub>2</sub> O	Ag	MIM	900 (cofired)	3	20	15	200
Kohler	Siebdruck	BST-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ag	MIM	850 (cofired)	1,75	158	70	200
Friederich	Ink-Jet	BST-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ag	MIM	850 (cofired)	3,4	180	19,1	200

# Zusammenfassung

- **Varaktorenarten – Vorteile des MIM-Aufbaus gegenüber planarem Aufbau**
- **Materialentwicklung BST-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Komposite**
  - Herabsetzung der Sinteremperatur
  - Wahrung der dielektrischen Eigenschaften
  - Herstellung vollständig-siebgedruckter MIM-Varaktoren und Phasenschiebern
- **Transfer auf Tintenstrahldruck**
  - Prozessentwicklung
  - Optimierung Tintenzusammensetzung
  - Herstellung vollständig gedruckter Bauteile

# Ausblick

- Siebdruck LTCC
- Ink-Jet-Printing Flexible Elektronik